

УДК 681.527.3

Скворчевський О.Є.

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТІВ ДЛЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРОПОРЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

### **Постановка проблеми в загальному вигляді**

Електромагніти зі значною горизонтальною ділянкою на тяговій характеристиці отримали назву пропорційних. Вони мають лінійну залежність зусилля на штовхачі якоря від струму керування. Це дозволяє використовувати їх в гідравлічних апаратах для пропорційного керування елементами сопло-заслінка, золотниками тощо. Розробка таких електромагнітів є невід'ємною частиною створення багатофункціональних пропорційних електрогідравлічних перетворювачів (БПЕГП) для систем приводів, що використовуються у колісних та гусеничних машинах спеціального призначення.

### **Аналіз публікацій**

Найбільш ефективним підходом для отримання відповідних тягових характеристик електромагнітів є введення в область їх робочого прозору феромагнітних шунтів, які перерозподіляють магнітний потік.

Задачу пошуку необхідної конфігурації феромагнітних шунтів можна звести до задачі визначення магнітної провідності робочого прозору між полюсами електромагніта. Аналіз та розрахунок магнітної провідності робочого прозору електромагніту представлений в значній кількості опублікованих робіт. Але магнітне поле в робочих прозорах тримірне, неоднорідне і обмежується опірними поверхнями сталевих полюсів з різною та часто складною конфігурацією. Тому аналітичні методи розрахунку провідностей використовуються лише в деяких випадках [1, 2, 3]. Використання методів варіаційного обчислення, конформних відображень, метода сіток тощо практично незначно розширює коло задач, що можуть бути вирішені. Ці методи, як правило, ґрунтуються на тому, що дійсна картина поля в робочому прозорі замінюється деякою моделлю, що дає можливість використовувати приблизні методи для розрахунку провідностей. Одним з таких методів є метод укрупнених трубок. Але ці методи можуть давати похибку до 30% [2]. В роботі [2] пропонується використовувати експериментальний метод, результати якого, отримані на конкретних полюсах, узагальнюються для групи однотипних полюсів. З використанням цього методу автором статті розроблені пропорційні електромагніти для роботи у складі гідроапаратури, зокрема у складі БПЕГП. Рациональні параметри феромагнітних шунтів цих електромагнітів, опис їх конструкції та функціонування представлені в роботах [4, 5, 6]. Однак, в цих роботах не описана методика досліджень та експериментальна установка, які дозволяють вибрати раціональні параметри феромагнітного шунта рухомого полюса та досягти необхідної форми тягової характеристики пропорційного електромагніту.

### **Мета статті**

Дана публікація має на меті опис експериментальної установки, обґрунтування та регламентацію вимог до компонентів та підготовки досліджень, а також подання тягової характеристики пропорційного електромагніту з раціональною конфігурацією феромагнітного шунта рухомого полюса.

### **Методика досліджень та експериментальна установка**

**Методика досліджень** Об'єктом даного дослідження є тягові характеристики пропорційного електромагніта. Тяговою характеристикою електромагніту називається залежність зусилля на штовхачі якоря від відстані між торцем рухомого полюса та не-

рухомим полюсом при різних значеннях струму в обвитці котушки електромагніта [1, 2, 3]. Предметом дослідження є вплив конфігурації феромагнітних шунтів рухомого полюса електромагніта на його тягові характеристики.

Для отримання тягових характеристик необхідно вимірювати відстань від торця рухомого полюса до нерухомого полюса та зусилля, що відповідають кожній відстані. Вимірювання відстані проводяться мікрометричними індикаторами переміщень. Вимірювання сили здійснюється тарованою пружиною. Струм керування встановлюється за допомогою блока живлення та контролюється амперметром.

Обґрунтування та регламентація вимог до компонентів та підготовки досліджень полягала у наступному:

1. Основні частини експериментальної установки були виготовлені із немагнітних матеріалів. Це необхідно для виключення перерозподілу магнітних потоків.
2. Джерела сильних електромагнітних полів, зокрема блок живлення, мають знаходитись на відстані 3...5 м від експериментальної установки.
3. Дослідження проводились на одному електромагніті, в якому змінювались рухомі полюси з різною конфігурацією феромагнітних шунтів.
4. Матеріали, технологія виготовлення, особливо термообробка варіантів рухомих полюсів забезпечувались однаковими.
5. Перед початком досліджень вмикався електромагніт та давалась йому можливість прогрітись протягом 5 хв. Це значно зменшувало вплив зміни температури обвитки електромагніту на значення струму в ній.

**Оцінка похибки вимірювань** Для зменшення похибки вимірювань застосовується метод багатократних спостережень [7, 8]. Кількість спостережень для кожного вимірювання приймаємо  $n = 5$ . Наприклад, для струму 1,5 А та відстані від рухомого до нерухомого полюса 2 мм отримаємо наступний набір значень тягових зусиль  $F_1 = 148$  Н,  $F_2 = 154$  Н,  $F_3 = 152$  Н,  $F_4 = 150$  Н,  $F_5 = 146$  Н. За результат вимірювання зусилля приймаємо його середнє арифметичне значення:

$$F = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n F_i, \quad (1)$$

де  $F$  – вимірюване значення зусилля;  $F_i$  – значення зусилля для  $i$ -го вимірювання.

Для даних значень струму керування та відстані від рухомого до нерухомого полюсів тягове зусилля  $F = 150$  Н.

Вибіркова дисперсія випадкових похибок результатів вимірювань:

$$S_n^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (F_i - F)^2. \quad (2)$$

В даному випадку  $S_n^2 = 10$  Н<sup>2</sup>.

Дисперсія випадкової похибки середнього значення в  $n$  разів менша за оцінку дисперсії окремих результатів вимірювань:

$$S_F^2 = \frac{S_n^2}{n}. \quad (3)$$

Дисперсія випадкової похибки середнього значення  $S_F^2 = 2$  Н<sup>2</sup>.

Довірчі границі похибки (непевність результату вимірювання) розраховуються за формулою:

$$\Delta_{\bar{F}} = \pm t(f, P_{\text{дов}}) \cdot S_{\bar{F}}, \quad (4)$$

де  $t(f, P_{\text{дов}})$  – коефіцієнт, що взятий з таблиці для розподілу Стюдента [8], що залежить від кількості ступенів свободи  $f$ , яка в цьому випадку дорівнює  $f = n - 1$ , та довірчої імовірності  $P_{\text{дов}}$ .

При  $n = 5$ ,  $P_{\text{дов}} = 0,95$  довірчі границі похибки  $\Delta_{\bar{x}} = \pm 3,9$  Н.

За даними [8], якщо дослідження виконувались тими самими засобами в тих же самих умовах для розрахунку можна використовувати значення дисперсії відоме з попередніх досліджень.

**Опис схеми та функціонування експериментальної установки** Дослідження тягових характеристик пропорційного електромагніта проводилися на експериментальній установці, схема якої представлена на рис. 1.

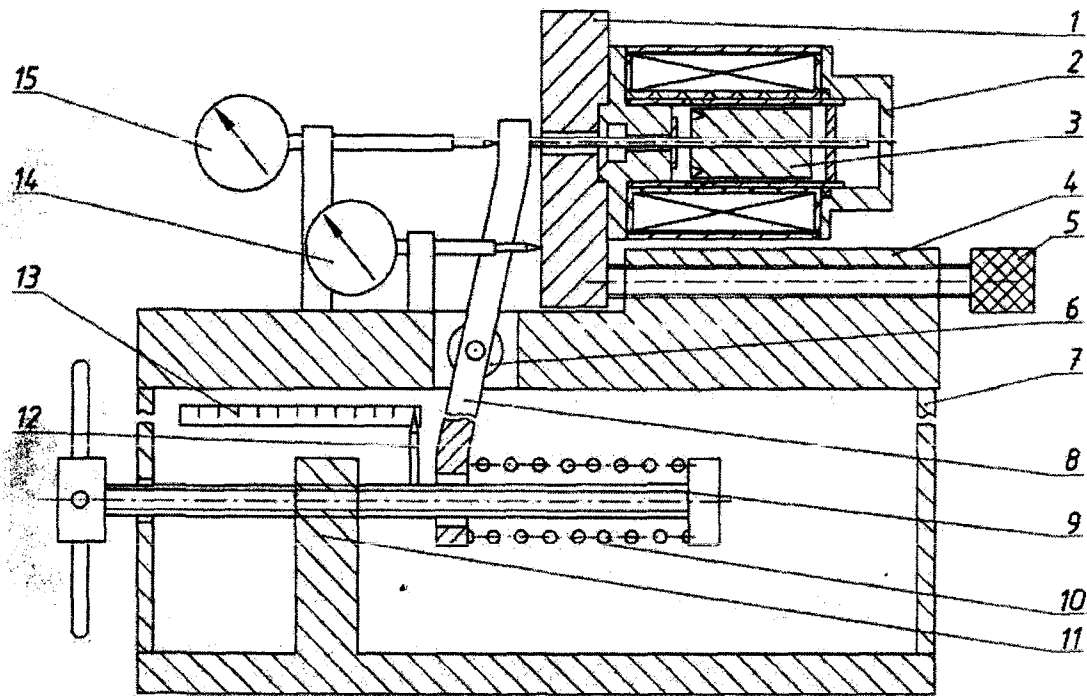


Рисунок 1 - Схема експериментальної установки:

- 1 – каретка; 2 – пропорційний електромагніт; 3 – рухомий полюс пропорційного електромагніта; 4 – станина; 5 – гвинт переміщення каретки; 6 – бронзові цапфи; 7 – корпус;
- 8 – важіль; 9 – гвинт стиснення пружини; 10 – тарована пружина; 11 – опора з різьбою;
- 12 – стрілка; 13 – шкала; 14 – мікрометричний індикатор переміщення каретки;
- 15 – мікрометричний індикатор переміщення рухомого полюса

Вона складається з каретки 1 зі встановленим на ній пропорційним електромагнітом 2, що досліджується, який містить рухомий полюс 3. Каретка 1 встановлена на станині 4 так, що вона може переміщуватись гвинтом 5. Станина 4 має отвір з бронзовими цапфами 6, в яких закріплений важіль 8, один з кінців якого спирається на штовхач рухомого полюса 3 пропорційного електромагніту 2, а інший – на таровану пружину 10. Зусилля пружини 10 регулюється гвинтом 9, який може переміщуватися по різьбі опори 11, що жорстко з'єднана з корпусом 7. З гвинтом 9 з'єднана стрілка 12, яка по

шкалі 13 показує зусилля стискання пружини. Переміщення каретки 1 з пропорційним електромагнітом 2 контролюється мікрометричним індикатором 14, а переміщення рухомого полюса 3 контролюється мікрометричним індикатором 15.

На рис. 2 показаний загальний вигляд експериментальної установки із закріпленим на ній пропорційним електромагнітом. На рис. 3 показано кріплення електромагніту на каретці експериментальної установки.

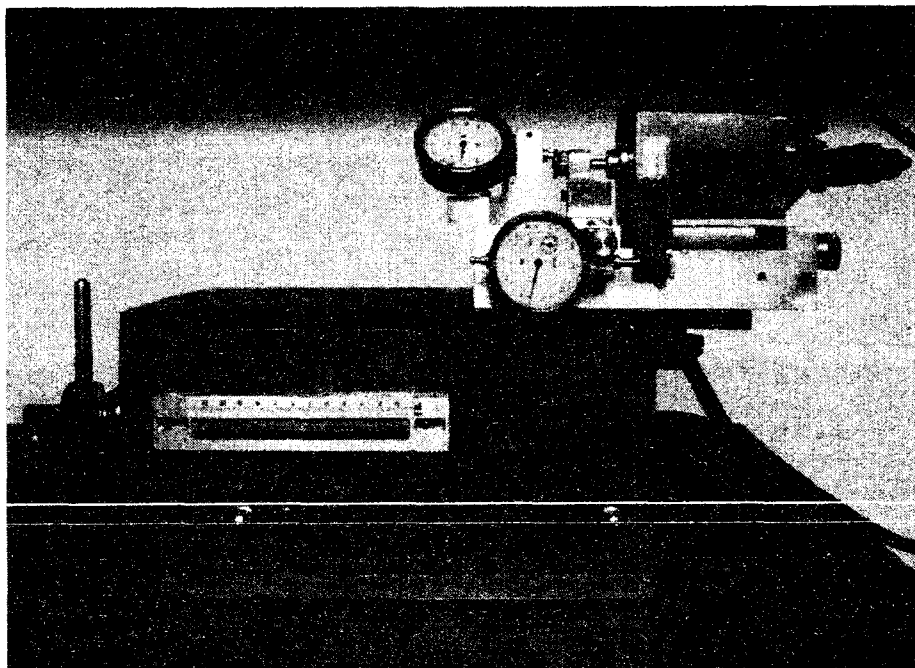


Рисунок 2 - Загальний вигляд експериментальної установки

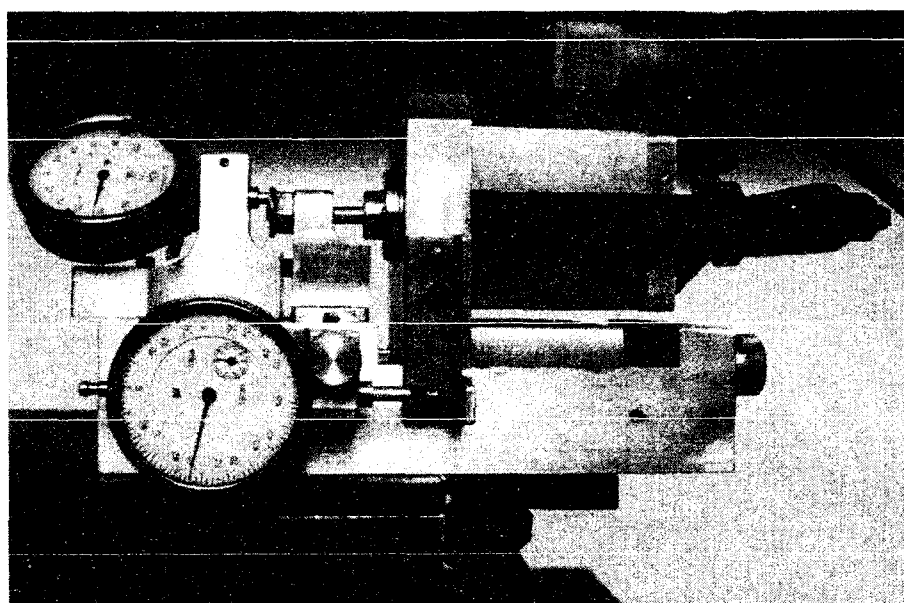


Рисунок 3 - Кріплення електромагніту на каретці експериментальної установки

Дослідження тягових характеристик пропорційного електромагніту проводились наступним чином. Електромагніт 2 закріплювався на каретці 1. Рухомий полюс 3 встановлювався на визначену відстань від нерухомого полюсу за допомогою гвинта 5. Від-

стань від рухомого полюса 3 до нерухомого полюса електромагніту контролювалася за допомогою мікрометричного індикатора 15. На обмотку котушки пропорційного електромагніту 2 подавалося визначене значення струму. Для кожного значення відстані від рухомого до нерухомого полюса, що контролювалося за допомогою мікрометричних індикаторів переміщення 14, 15 визначалося зусилля на рухомому полюсі за допомогою пружини 10. Таким чином будувалися тягові характеристики для різних значень струму керування. Для зменшення впливу випадкових факторів на результати досліджень вони проводилися на одному електромагніті, в якому змінювались рухомі полюси з різною конфігурацією феромагнітних шунтів (рис. 4).

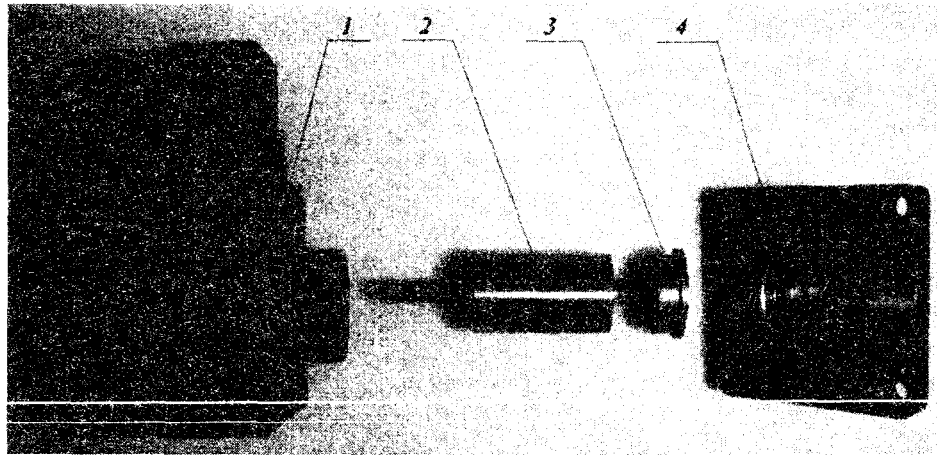


Рисунок 4 – Деталі пропорційного електромагніту з тяговим зусиллям до 150 Н при струмі 1,5 А:

- 1 – зовнішній магнітопровід, котушка, біметалева гільза (узборі);  
2 – рухомий полюс; 3 – бронзова втулка; 4 – алюмінієва кришка

Завдяки проведеним дослідженням було встановлено, що для роботи у складі гідроапаратури колісних та гусеничних машин, зокрема у БПЕГП, найбільш прийнятними є пропорційні електромагніти, у яких феромагнітний шунт виконаний на рухомому полюсі як два елементи, один з котрих має змінний переріз, що збільшується з віддаленням від торця рухомого полюса та утворений частиною рухомого полюса між периферійною боковою поверхнею кільцевої канавки та зовнішньою циліндричною поверхнею рухомого полюса, а другий елемент шунта утворений іншою боковою поверхнею канавки та торцевою поверхнею рухомого полюса (рис. 5). Таким чином, на торці рухомого полюсу, що звернений до нерухомого полюсу виконується кільцева канавка трикутного перерізу. Ширина  $H_K$  кільцевої канавки зв'язана з діаметром рухомого полюса залежністю  $D_H/H_K = 4,5-5,5$ . Кут між периферійною боковою поверхнею та внутрішньою боковою поверхнею кільцевої канавки в поздовжньому перерізі рухомого полюса становить  $40-50^\circ$ . Периферійна бокова поверхня кільцевої канавки трикутного перерізу має конічну форму та перехрещується під кутом  $25-35^\circ$  із зовнішньою циліндричною поверхнею рухомого полюса.

Також в ході досліджень було встановлено, що якщо периферійна бокова поверхня кільцевої канавки трикутного перерізу та зовнішня циліндрична поверхня рухомого полюса утворюють гостру кромку, то тягове зусилля практично не змінюється у межах пропорційної ділянки на характеристиці. Такі електромагніти доцільно використовувати разом з датчиками положення у складі пропорційних гідравлічних розподільників золотникового типу.

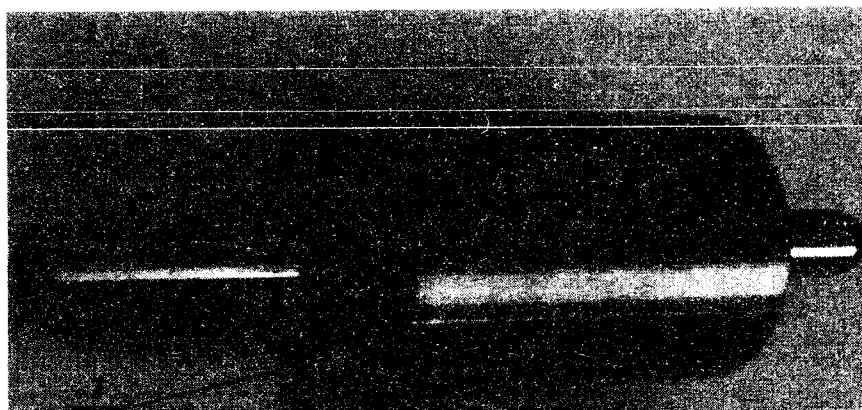


Рисунок 5 – Рухомий полюс пропорційного електромагніту з тяговим зусиллям до 150 Н при струмі 1,5 А:  
1 – перший елемент феромагнітного шунта рухомого полюса;  
2 – другий елемент феромагнітного шунта рухомого полюса; 3 – пояс

При наявності пояса шириною 0,5-1,5 мм між периферійною боковою поверхнею кільцевої канавки трикутного перерізу та зовнішньою циліндричною поверхнею рухомого полюса на тяговій характеристиці є ділянка з підвищеною електромагнітною жорсткістю [5]. Наявність такої ділянки еквівалентна від'ємному зворотному зв'язку по положенню, що зменшує вплив пульсацій тиску та витрати робочої рідини на роботу гідроапарата, у складі якого використовується такий електромагніт. Електромагніти такого типу доцільно використовувати разом з елементами сопло-заслінка, зокрема у багатофункціональних пропорційних електрогідравлічних перетворювачах.

Тягові характеристики і залежність тягового зусилля від струму керування такого пропорційного електромагніту представлені на рис. 6.

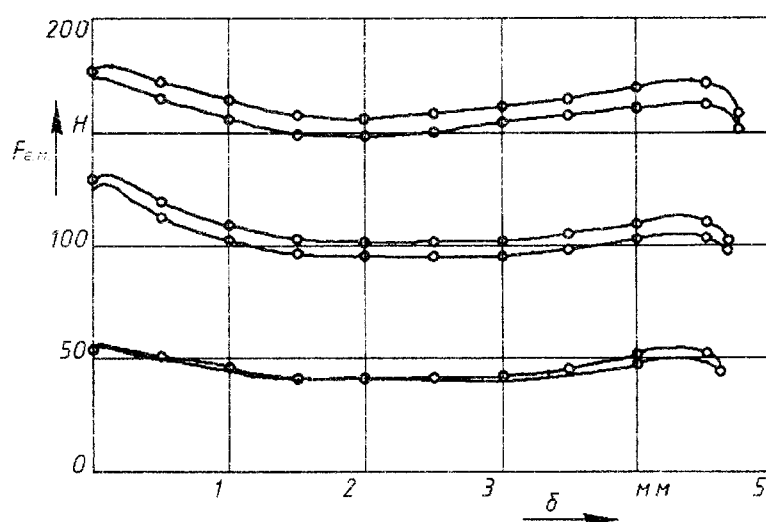


Рисунок 6 - Тягові характеристики електромагніту для багатофункціональних пропорційних електрогідравлічних перетворювачів

### Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведені дослідження на експериментальній установці дозволили визначити раціональні параметри феромагнітних шунтів рухомого полюса пропорційного електромагніта та створити електромагніт з необхідними тяговими характеристиками для роботи у складі БПЕГП [6]. В подальшому передбачається дослідити робочі процеси

гідравлічної частини БПЕГП, а також взаємодію електромеханічної та гідравлічної частин перетворювача. За результатами експериментальних досліджень необхідно провести ідентифікацію математичної моделі БПЕГП, представленої в роботах [9, 10].

Література: 1. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960 – 447 с. 2. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с. 3. Гинзбург Л.Б., Федотов А.И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. – Л. Машиностроение, 1980. – 364 с. 4. Скворчевский А.Е. Исследование характеристик маслонаполненных пропорциональных электромагнитов для гидроаппаратуры мобильных машин // *Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал.* – 2002. – № 1. – С. 159-166. 5. Скворчевський О.Є. Дослідження впливу конструктивних факторів на статичні тягові характеристики маслонаповнених пропорційних електромагнітів гідроапаратури // *Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення у сучасних технологіях.* – 2004. – № 47. – С. 28-33. 6. Патент України на винахід № 75780. Пропорційний електромагніт. Авт. Скворчевський О.Є., Заявка № 20040705646 від 12.07.2004 МПК (2006) H01F7/08. Опубл. 15.05.2006, бюл. № 5. 7. Проненко В.И., Якирин Р.В. Метрология в промышленности. – К.: Техніка, 1979. – 223 с. 8. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003. – 544 с. 9. Скворчевський О.Є. Математичний опис електромеханічних процесів у багатофункціональному пропорційному електрогідравлічному перетворювачі // *Вісн. НТУ «ХПІ». Транспортне машинобудування.* – 2006. – № 26. – С. 188 – 195. 10. Скворчевський О.Є. Математична модель багатофункціонального пропорційного електрогідравлічного перетворювача // *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* – 2006. – № 6. – С. 30 – 33.

Скворчевский А.Е.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

В статье представлено описание экспериментальной установки и методики исследований тяговых характеристик электромагнитов для многофункциональных пропорциональных электрогидравлических преобразователей. Приведена информация о результатах исследований. Определены рациональные параметры ферромагнитного шунта подвижного полюса электромагнита, позволяющие получить пропорциональную тяговую характеристику заданной формы.

Skvorchevsky A.Y.

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF TOWING PERFORMANCES OF  
ELECTROMAGNETS FOR MULTIFUNCTION PROPORTIONAL ELECTRO-  
HYDRAULIC CONVERTERS**

In the article presents specification the experimental setting and method of researches of towing performances of electromagnets for multifunction proportional electro-hydraulic converters. Material includes information about the results of researches. The rational parameters of ferromagnetic shunt of mobile pole of electromagnet are definite.

---